

Patent Specification

DE 199 00 738 C1

(54) Process and device for determining the combustion chamber pressure pattern in an internal combustion engine

(57) The invention relates to a process and a device for determining the combustion chamber pressure pattern in an internal combustion engine, for which by means of a combustion chamber sensor the measured pressure values of the combustion chamber are recorded at least over one compression phase partial area and/or expansion phase partial area of a respective internal combustion engine working cycle and the combustion chamber pressure pattern is determined at least over a partial area of a respective working cycle by means of an evaluation procedure of the recorded measurement values with consideration of the polytropic equation and the sensor offset.

As claimed in the invention, in the evaluation procedure the combustion chamber pressure pattern is determined by an estimation process from the polytropic equation corrected for sensor offset, the sensor offset being treated as an variable quantity with a pattern which is determined using a comparison of the estimated to the measured pressure values. A device which carries out the process contains a Kalman filter for carrying out the estimation process.

Use for example for determining the combustion chamber pressure pattern of motor vehicle internal combustion engines with thermoshock compensation.

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Patentschrift**  
⑩ **DE 199 00 738 C 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 01 M 15/00**  
F 02 D 41/00  
G 01 L 23/00

②1 Aktenzeichen: 199 00 738.1-52  
②2 Anmeldetag: 12. 1. 1999  
④3 Offenlegungstag: –  
④5 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 15. 6. 2000

DE 199 00 738 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:  
DaimlerChrysler AG, 70567 Stuttgart, DE

⑦2 Erfinder:  
Hart, Martin, Dipl.-Ing., 70771  
Leinfelden-Echterdingen, DE; Ziegler, Michael,  
Dipl.-Ing., 89073 Ulm, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 195 44 613 A1  
DE 195 06 133 A1  
DE 43 26 949 A1  
EP 03 99 069 A1  
WO 95 16 196 A1  
WO 89 03 983 A1

C. BURKHARDT, M. BARGENDE:  
Thermoschockkorrek-  
tur bei Druckindizierungen mit Zünd- und Glüh-  
kerzenadaptoren MTZ 56 (1995) 12, S.736ff.;

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung eines Brennraumdruckverlaufs bei einer Brennkraftmaschine

⑤7 Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung eines Brennraumdruckverlaufs bei einer Brennkraftmaschine, bei denen mittels eines Brennraumdrucksensors Brennraumdruckmeßwerte wenigstens über einen Kompressionsphasen- und/oder Expansionsphasen-Teilbereich eines jeweiligen Brennkraftmaschinen-Arbeitsspiels hinweg aufgenommen werden und der Brennraumdruckverlauf wenigstens über einen Teilbereich eines jeweiligen Arbeitsspiels hinweg mittels einer Auswerteprozedur der aufgenommenen Meßwerte unter Berücksichtigung der Polytropengleichung und eines Sensoroffsets bestimmt wird. Erfindungsgemäß wird in der Auswerteprozedur der Brennraumdruckverlauf durch ein Schätzverfahren aus der Polytropengleichung sensoroffsetkorrigiert bestimmt, wobei der Sensoroffset als variable Größe behandelt wird, deren Verlauf anhand eines Vergleichs der geschätzten mit den gemessenen Druckwerten ermittelt wird. Eine verfahrensdurchführende Vorrichtung beinhaltet ein Kalman-Filter zur Durchführung des Schätzverfahrens. Verwendung z.B. zur Bestimmung des Brennraumdruckverlaufs von Kraftfahrzeug-Verbrennungsmotoren mit Thermoschockkompensation.

DE 199 00 738 C 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung eines Brennraumdruckverlaufs bei einer Brennkraftmaschine sowie auf eine zur Durchführung eines solchen Verfahrens geeignete Vorrichtung.

Es ist bekannt, den Brennraumdruck in Brennkraftmaschinen mittels Brennraumdrucksensoren zu erfassen, denen ein optisches oder piezo-elektrisches bzw. piezo-resistives Sensorprinzip zugrundeliegt. Bei beiden Sensorprinzipien beeinflussen die durch den Verbrennungsprozeß im Brennraum auftretenden Temperaturschwankungen die Auswertung des Sensorsignals. Durch den auftretenden Wärmestrom verspannt sich die Sensormembran, und dem eigentlichen Nutzsignal überlagert sich eine temperaturabhängige Komponente, wobei eine Kurzzeittemperaturdrift und eine Mittel-/Langzeittemperaturdrift zu unterscheiden sind. Letztere tritt beispielsweise bei Lastwechseln auf, die zu einem mittleren Wärmestrom in die Sensormembran führen. Dieser Einfluß ist sehr langsam gegenüber den typischen Nutzsignaländerungen und kann daher z. B. durch eine geeignete Hochpaßfilterung eliminiert werden. Die Kurzzeittemperaturdrift wird von dem kurzzeitigen großen Temperaturanstieg bei der Verbrennung verursacht, der zu einer starken Verspannung der Sensormembran führt. Diese als sogenannte Thermoschock bezeichnete Störung liegt im Frequenzbereich des Nutzsignals. Direkt nach Beginn der Verbrennung verspannt sich die Membran am stärksten; danach klingt dieser Einfluß zeitabhängig im weiteren Verlauf eines jeweiligen Arbeitsspiels wieder ab.

Es wurden bereits verschiedene Verfahren zur Bestimmung des absoluten, d. h. wahren Brennraumdrucks aus dem relativen, d. h. dem gemessenen und mit dem erwähnten Sensorfehlverhalten behafteten Brennraumdruck vorgeschlagen. So kann die Druckmessung des Brennraumdrucksensors mit der Druckmessung eines Saugrohrdrucksensors abgeglichen werden, der nicht den starken thermischen Schwankungen im Brennraum ausgesetzt ist. Dieses Verfahren erfordert jedoch einen Saugrohrdrucksensor. Alternativ kann eine iterative Nulllinienfindung mittels einer Brennverlaufsrechnung durchgeführt werden, was jedoch einen vergleichsweise hohen Rechenaufwand erfordert, so daß diese Methode für Brennkraftmaschinen von Kraftfahrzeugen in der Praxis nur offline, d. h. nicht in Echtzeit durchführbar ist. Weiter alternativ ist eine thermodynamische Nullpunktskorrektur mittels der sogenannten Polytropengleichung an zwei Punkten einer jeweiligen Kompressionsphase möglich, dieses Verfahren reagiert jedoch sehr sensitiv auf Störungen im Drucksignal des Sensors und erlaubt lediglich die Bestimmung eines mittleren, konstanten Offsets des Sensorsignals, hingegen keinen variablen Offsetverlauf über ein jeweiliges Arbeitsspiel der Brennkraftmaschine hinweg.

So ist aus der Offenlegungsschrift DE 195 44 613 A1 ein Verfahren zur dynamischen Korrektur des oberen Totpunktes eines jeweiligen Arbeitsspiels während der Auswertung des Brennraumdruckverlaufes bekannt, das eine Ermittlung des Kompressionsdruckverlaufes über ein theoretisches Modell basierend auf dem gemessenen Brennraumdruckverlauf und einen Vergleich des ermittelten mit dem gemessenen Druckverlauf vorsieht, um in Abhängigkeit von der festgestellten Differenz den Druckverlauf um einen zugehörigen Kurbelwinkelwert zu verschieben. Dieser Vorgang wird iterativ so lange wiederholt, bis der anhand des theoretischen Modells ermittelte Kompressionsdruckverlauf innerhalb eines vorgebbaren Konvergenzbandes des gemessenen Druckverlaufes liegt. Dem theoretischen Modell des Kompressionsdruckverlaufes wird die Polytropengleichung zugrundegelegt, wobei zur Anpassung an den gemessenen

Druckverlauf ein variabler Polytropenexponent zugelassen wird, der bestmöglich anhand von zwei Funktionswertpaaren des gemessenen und geglätteten Druckverlaufes ermittelt wird. Die Druckverlaufsverschiebung wird dann in Abhängigkeit von Größe und Richtung der Abweichung des sich anhand des so ermittelten Polytropenexponenten ergebenden theoretischen Druckverlaufes vom gemessenen Druckverlauf vorgenommen.

In dem Zeitschriftenaufsatz C. Burkhardt und M. Barge, Thermoschockkorrektur bei Druckindizierungen mit Zünd- und Glühkerzenadaptern, MTZ Motortechnische Zeitschrift 56 (1995) 12, Seite 736 wird vorgeschlagen, die aufgrund des Thermoschockeffektes auftretende Kurzzeittemperaturdrift eines in eine Zünd- oder Glühkerze integrierten, ungekühlten Drucksensors aus einem zugrundegelegten Wärmestrommodell für die Zünd- bzw. Glühkerze ermitteln und das Sensorsignal entsprechend zu korrigieren.

In der Offenlegungsschrift DE 43 26 949 A1 ist für ein Managementsystem einer Kolbenbrennkraftmaschine eine Lastpunktbestimmung anhand von während der Kompressionsphase in mehreren diskreten Kurbelwinkelstellungen mittels eines Brennraumdrucksensors gemessenen Brennraumdruckwerten vorgesehen. Für die hierzu vorgenommene Auswertung des Sensorsignals wird angenommen, daß dieses aus einer zum momentanen Druckwert proportionalen Analogspannung besteht, der ein unbekannter, annähernd konstanter Gleichspannungswert überlagert ist, welcher somit einen in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel konstanten Sensoroffset darstellt. Unter Benützung der Polytropengleichung und einer entsprechenden Anzahl von Meßwertpaaren wird ein überbestimmtes Gleichungssystem abgeleitet, aus dem der Sensoroffset und ein Referenzdruckwert bei einem vorgegebenen Kurbelwinkel-Referenzwert nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden.

Weitere Verfahren zur Bestimmung des Brennraumdrucks, die eine Druckerfassung durch einen Brennraumdrucksensor und eine Auswertung der erhaltenen Meßwerte unter Heranziehung der Polytropengleichung umfassen, sind in den Offenlegungsschriften WO 89/03983 A1 und EP 0 399 069 A1 beschrieben.

Der Erfindung liegt als technisches Problem die Bereitstellung eines Verfahrens und einer Vorrichtung der eingangs genannten Art zugrunde, mit denen sich der Brennraumdruck bei einer Brennkraftmaschine in seinem Verlauf über ein jeweiliges Arbeitsspiel hinweg mittels eines Brennraumdrucksensors ohne zusätzlichen Sensor möglichst in Echtzeit, vergleichsweise genau und relativ unempfindlich gegen Sensorsignalstörungen bestimmen läßt.

Die Erfindung löst dieses Problem durch die Bereitstellung eines Verfahrens mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie einer Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 7.

Das Verfahren nach Anspruch 1 beinhaltet eine Auswerteprozedur, mit welcher der Brennraumdruck in seinem Verlauf über wenigstens einen Kompressionsphasen- und/oder Expansionsphasen-Teilbereich eines jeweiligen Arbeitsspiels hinweg unter Verwendung eines Schätzverfahrens aus der in diesem Bereich gültigen Polytropengleichung sensoroffsetkorrigiert bestimmt wird, wobei zusätzlich der Sensoroffset als über den betreffenden Arbeitsspielbereich hinweg variable Größe behandelt wird, deren Verlauf anhand eines Vergleichs der geschätzten mit den gemessenen Brennraumdruckwerten ermittelt wird.

Damit berücksichtigt das Verfahren den in der Praxis über ein jeweiliges Arbeitsspiel, speziell auch einem Kompressionsphasen-Teilbereich desselben, im allgemeinen nicht konstanten Verlauf des Sensoroffsets, wie er sich insbesondere bei Verwendung ungekühlter Drucksensoren aufgrund des

Thermoschockeffektes ergibt. Demzufolge läßt sich mit diesem Verfahren der Brennraumdruckverlauf mindestens im betreffenden Arbeitsspiel-Teilbereich und in den allermeisten Fällen insgesamt über das ganze Arbeitsspiel hinweg in seinem Verlauf genauer bestimmen als bei Annahme eines konstanten Sensoroffsets, ohne daß ein zusätzlicher Sensor, wie ein Saugrohrdrucksensor, erforderlich ist. Da ein derartiges Schätzverfahren mit geringerem Rechenaufwand als beispielsweise eine Brennverlaufsrechnung durchführbar ist, läßt es sich auch bei Verbrennungsmotoren in Kraftfahrzeugen mit den dort begrenzten Rechenkapazitäten problemlos in Echtzeit ausführen. Dies erlaubt eine phasenkorrekte Brennraumdruckverlauf-Mittelwertbildung in Echtzeit, d. h. im Onlinebetrieb. Durch geeignete Auslegung läßt sich ein solches Schätzverfahren zudem sehr unempfindlich gegen Störungen des Brennraumdrucksensorsignals halten.

Bei einem nach Anspruch 2 weitergebildeten Verfahren wird für die Schätzung ein diskretes Schrittverfahren verwendet, in welchem sukzessive in Inkrementen einer zugehörigen Arbeitsspiel-Kenngröße, wie dem Kurbelwinkel, ein neuer Brennraumdruck-Schätzwert aus der Polytropengleichung anhand des im vorigen Schritt enthaltenen Brennraumdruck- und Sensoroffsetwertes gewonnen wird. Der durch dieses geschätzte Hochrechnen erhaltene Brennraumdruckverlauf kann dann mit dem gemessenen Druckverlauf zur Aktualisierung des Sensoroffsetverlaufs verglichen werden.

Bei einem nach Anspruch 3 weitergebildeten Verfahren ist als Schätzverfahren eine Kalman-Filterung vorgesehen, bei welcher der gemessene Brennraumdruck als Eingangsgröße, der geschätzte Brennraumdruck und der geschätzte Sensoroffset hingegen als Zustandsgrößen dienen. Insbesondere läßt sich hierzu eine lineare, zeitvariante Kalman-Filterung mit einem hinsichtlich der benutzten Arbeitsspiel-Kenngröße, z. B. dem Kurbelwinkel, diskreten Zustandsraummodell verwenden.

Bei einem nach Anspruch 4 weitergebildeten Verfahren wird in der Schätzung des Sensoroffsetverlaufs ein treibender Term in Form von weißem Rauschen verwendet.

Bei einem nach Anspruch 5 weitergebildeten Verfahren ist eine lastabhängige Gewichtung der modellbildenden Polytropengleichung gegenüber den gemessenen Druckwerten vorgesehen, um zu berücksichtigen, daß in diesem Lastbereich das Signal-/Rauschverhältnis aufgrund des geringen absoluten Brennraumdrucks verhältnismäßig klein ist.

Bei einem nach Anspruch 6 weitergebildeten Verfahren wird der Polytropengleichungsexponent in Abhängigkeit von der Brennkraftmaschinentemperatur variabel vorgegeben, was der temperaturabhängigen Natur dieses Exponenten besser Rechnung trägt als die Annahme eines in Abhängigkeit von der Brennkraftmaschinentemperatur konstanten Exponenten.

Die Vorrichtung nach Anspruch 7 eignet sich zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 3 bis 6 und beinhaltet zu diesem Zweck insbesondere ein geeignetes Kalman-Filter.

Bei einer nach Anspruch 8 weitergebildeten Vorrichtung können in den Kalman-Filter eine variable Modellierungs-Kovarianz und/oder eine variable Messungs-Kovarianz von außen eingegeben werden, um die Modellierung in Form des polytropen Zustandsübergangs bzw. die gemessenen Brennraumdruckwerte je nach Bedarf mehr oder weniger stark zu gewichten.

Eine vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung ist in den Zeichnungen dargestellt und wird nachfolgend beschrieben. Hierbei zeigen:

Fig. 1 ein Diagramm typischer, mit einem gekühlten bzw. ungekühlten Drucksensor gemessener Brennraumdruckver-

läufe über ein Arbeitsspiel hinweg,

Fig. 2 ein Diagramm des thermoschockbedingten Unterschieds der beiden Druckverläufe von Fig. 1,

Fig. 3 ein Brennraumdruck-Kompressionsphasen-Diagramm zur Veranschaulichung eines gemessenen Druckverlaufs und verschiedener idealer Polytropengleichungs-Druckverläufe,

Fig. 4 ein Blockdiagramm eines Kalman-Filters zur Schätzung des Brennraumdruckverlaufs und

Fig. 5 ein Druckverlaufs-Kompressionsphasen-Diagramm zur Veranschaulichung eines durch Verwendung des Kalman-Filters von Fig. 4 erhaltenen Ergebnisses einer Bestimmung des sensoroffsetkorrigierten Brennraumdruckverlaufs.

In Fig. 1 ist der typische Verlauf des von einem ungekühlten Brennraumdrucksensor gemessenen Brennraumdrucks in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel über ein Arbeitsspiel eines Kraftfahrzeug-Verbrennungsmotors hinweg mit einer durchgezogen gezeichneten Kennlinie wiedergegeben. Zum Vergleich ist mit einer gestrichelt gezeichneten Kennlinie der für dasselbe Arbeitsspiel von einem gekühlten Brennraumdrucksensor gemessene Brennraumdruckverlauf wiedergegeben. In beiden Fällen ist der charakteristische Druckanstieg während der Kompressionsphase bis zum Eintritt der Verbrennung und der anschließende Druckabfall während der Expansionsphase zu erkennen. Die vorhandenen, wenngleich im Maßstab von Fig. 1 nicht besonders deutlich hervortretenden Unterschiede in den beiden Druckverläufen beruhen darauf, daß die vom Thermoschockeffekt verursachte Kurzzeitemperaturdrift beim gekühlten Brennraumdrucksensor weitgehend eliminiert ist, während sie beim ungekühlten Sensor in voller Stärke auftritt.

Fig. 2 zeigt deutlicher die Differenz zwischen den beiden Sensorsignalen, d. h. den auf dem Thermoschockeffekt beruhenden Druckbeitrag im Signal des ungekühlten Sensors bezogen auf das Signal des gekühlten Sensors. Der während der Verbrennung in die Sensormembran fließende Wärmestrom, der beim gekühlten Sensor sofort abgeleitet wird, verspannt die Membran des ungekühlten Sensors und führt durch das nach der Verbrennung erst allmähliche Abkühlen der Membran zu dem thermoschockbedingten Druckbeitrag, d. h. dem zeitabhängigen Sensoroffset, periodisch zum Arbeitsspiel. Wegen der nicht konstanten Wärmeabfuhr von der Membran ist der Sensoroffset über ein jeweiliges Arbeitsspiel hinweg nicht konstant. So steigt er im Beispiel von Fig. 2 während der Kompressionsphase leicht an. Deshalb führt eine Vorgehensweise, die einen solchen nicht konstanten Sensoroffsetverlauf berücksichtigt, zu einer genaueren und zuverlässigeren Bestimmung des absoluten, d. h. von solchen Sensorfehlereffekten bereinigten Brennraumdruckverlaufs.

Prinzipiell können verschiedene Phasen des Brennraumdruckverlaufs für die absolute Brennraumdruckbestimmung ausgewertet werden, die dann z. B. zur Ermittlung der in den jeweiligen Brennraum zugeführten Luftmasse herangezogen werden kann. Eine Auswertung während der Ladungswechselphase hat den Vorteil, daß die Information zeitlich sehr früh vorliegt, jedoch den Nachteil, daß das Absolutdruckniveau sehr niedrig und daher die Auflösung des Drucksensors nicht so gut ist. Eine Auswertung während der Verbrennungsphase ergibt zwar ein sehr gutes Signal-/Rauschverhältnis, jedoch sind die auftretenden Zyklen-schwankungen nur sehr schwierig modellierbar. Die Kompressions- und die Expansionsphase haben den Vorteil, daß sie beide sehr gut thermodynamisch beschreibbar sind und ein gutes Signal-/Rauschverhältnis aufweisen, so daß sie vorliegend bevorzugt zur nachfolgend näher beschriebenen Brennraumdruckverlaufsbestimmung unter Verwendung ei-

nes Schätzverfahrens herangezogen werden. Die Kompressionsphase hat dabei gegenüber der Expansionsphase den Vorteil, daß die Information zeitlich früher vorliegt.

Durch den nicht konstanten Sensoroffsetverlauf folgt der gemessene Brennraumdruckverlauf, insbesondere wenn für die Messung ein ungekühlter, temperatursensitiver Drucksensor basierend auf einem optischen oder einem Piezo-Sensorprinzip verwendet wird, nicht genau dem theoretischen, durch die Polytropengleichung beschriebenen Verlauf. Dies ist in Fig. 3 veranschaulicht, in der eine sensorisch erfaßte, durchgezogene gezeichnete Druckverlaufskurve während einer Kompressionsphase zwischen  $-100^\circ$  und  $-30^\circ$  Kurbelwellenwinkel vor dem oberen Totpunkt (ZOT) sowie beispielhaft drei auf der Polytropengleichung basierende Kennlinien gestrichelt wiedergegeben sind, die zu verschiedenen Druckanfangswerten beim Kurbelwinkel-Anfangswert von  $-100^\circ$  vor ZOT gehören. Wie aus Fig. 3 ersichtlich, beschreibt zwar die obere der drei Polytropenkurven die gemessene Druckverlaufskurve in einem mittleren Kompressionsphasenbereich recht zufriedenstellend, es zeigen sich jedoch deutliche Abweichungen im unteren und oberen Abschnitt der Kompressionsphase. Es ergibt sich in diesem Beispiel, daß unter der Annahme eines konstanten Sensoroffsets diejenige Polytropenkurve, die ungefähr bei einem Anfangsdruck von 0,6 bar am Kurbelwinkel-Anfangswert von  $-100^\circ$  vor ZOT startet, die gemessene Druckverlaufskurve noch am besten approximiert.

Ausgehend davon wird nun vorliegend die Bestimmung des absoluten, sensorfehlerkorrigierten Brennraumdruckverlaufs unter Anwendung eines Schätzverfahrens vorgenommen, das zur Genauigkeitssteigerung einen nicht konstanten Verlauf des Sensoroffsets über ein Arbeitsspiel hinweg und insbesondere auch in dem in Fig. 3 gezeigten Kompressionsphasen-Teilbereich zuläßt und berücksichtigt. Dies erfolgt beispielsweise durch eine lineare, zeitvariante Kalman-Filterung. Dazu läßt sich ein Kalman-Filter 1 herkömmlichen und daher hier nicht weiter zu beschreibenden Aufbaus einsetzen, wie es in Fig. 4 als Funktionsblock dargestellt ist. In diesem Kalman-Filter 1 erfolgt eine Modellierung auf der Grundlage der in diesem Arbeitsspiel-Teilbereich gültigen Polytropengleichung. Als eine erste Zustandsvariable  $x_1$  für den Algorithmus des in herkömmlicher Weise in Hardware oder Software realisierten Kalman-Filters 1 wird daher der mittlere gemessene Brennraumdruck, auch Zylinderinnendruck genannt, herangezogen. Dem Sensoroffset, für den gleichfalls ein variabler Verlauf in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel bzw. irgendeiner anderen, den Ablauf eines jeweiligen Brennkraftmaschinen-Arbeitsspiel charakterisierenden Kenngröße zugelassen wird, wird im Kalman-Filter 1 eine zweite Zustandsgröße  $x_2$  zugeordnet, von der vorzugsweise angenommen wird, daß sie durch weißes Rauschen getrieben wird. Mit diesen Festlegungen werden dann durch die Kalman-Filterung in einem diskreten Schrittverfahren der polytrop geschätzte Brennraumdruck  $p_{\text{zyl}}$  und der Sensoroffset-Druckbeitrag  $p_{\text{offset}}$  für einen jeweils nächsten Schritt  $k+1$  ausgehend vom vorangegangenen Schritt  $k$  gemäß den folgenden Gleichungen sukzessiv hochgerechnet:

$$p_{\text{zyl}}(k+1) = (p_{\text{zyl}}(k) - p_{\text{offset}}(k)) \cdot (V_{\text{zyl}}(k)/V_{\text{zyl}}(k+1))^n + p_{\text{offset}}(k) \text{ und}$$

$$p_{\text{offset}}(k+1) = p_{\text{offset}}(k) + w(k),$$

wobei  $V_{\text{zyl}}$  das kurbelwinkelabhängige Brennraumvolumen,  $n$  den von der Brennkraftmaschinentemperatur  $T_{\text{mot}}$  abhängigen Polytropenexponenten und  $w$  weißes Rauschen bezeichnen. Die Erhöhung des Schrittzählers  $k$  um jeweils den

Wert eins bedeutet einen jeweils nächsten Berechnungszyklus und entspricht einem Fortschreiten um ein vorgebares Kurbelwinkelinkrement. Für die Meßgröße  $p_{\text{meß}}$  des Kalman-Filteralgorithmus gilt dann die Beziehung

$$p_{\text{meß}}(k) = p_{\text{zyl}}(k) + v(k)$$

mit dem Rauschterm  $v$ . Dieser Meßgröße entspricht als Eingangsgröße der vom Brennraumdrucksensor 2 tatsächlich gemessene Brennraumdruck. Des weiteren wird dem Kalman-Filter 1 einseitig die Information über den aktuell gültigen Wert des Polytropenexponenten  $n$  je nach momentaner Brennkraftmaschinen- bzw. Kühlwassertemperatur  $T_{\text{mot}}$  zugeführt. Zusätzlich werden in das Kalman-Filter 1 von außen wählbare Werte für eine Modellierungs-Kovarianz ( $Q$ ) und eine Messungs-Kovarianz ( $R$ ) eingegeben. Mit der Modellierungs-Kovarianz  $Q$  kann die Modellierung des polytropen Zustandsübergangs mehr oder weniger stark gewichtet werden. In gleicher Weise kann mittels der Messungs-Kovarianz das Meßresultat, d. h. das vom Sensor 2 gelieferte Brennraumdrucksignal, mehr oder weniger stark gewichtet werden. Damit ist es möglich, Modellierung und Messung in variabler Weise, z. B. lastabhängig, unterschiedlich zu gewichten. So kann es zweckmäßig sein, im Leerlauf oder im niedrigen Teillastbereich der Brennkraftmaschine die Modellierung stärker als die Messung zu gewichten, da dort das Signal-/Rauschverhältnis aufgrund des geringen absoluten Brennraumdrucks sehr klein und damit das Modellresultat zuverlässiger als das Sensorresultat ist.

Zum Starten der Kalman-Filterung werden dem Filter 1 ein erster Brennraumdruck-Meßwert  $x_0$  und ein Startwert  $P_0$  der in der Kalman-Filterung verwendeten Prädiktionsfehlerkovarianzmatrix eingegeben. Letzterer wird ausreichend hoch gewählt, damit das Filter 1 schnell einschwingt. Der Sensoroffset-Startwert kann anfänglich z. B. auf den Wert null gesetzt werden. Das Kalman-Filter nimmt dann eine Online-Mittelwertschätzung des Brennraumdruck-Meßwerts vor und bestimmt den Sensoroffset kurbelwinkelaufgelöst. Die Differenz beider Zustandswerte ergibt den absoluten Brennraumdruckverlauf kurbelwinkelaufgelöst in der Kompressionsphase.

Vorgehensweise und Resultat dieser Kalman-Filterung sind in Fig. 5 an einem Beispiel veranschaulicht. Die Schätzung beginnt bei einem Kurbelwinkel, wie  $-100^\circ$  vor ZOT, bei dem das Einlaßventil sicher geschlossen ist, und endet bei einem Kurbelwinkel, z. B.  $-30^\circ$  vor ZOT, in welchem noch in keinem Betriebspunkt die Zündung erfolgt. Der Schätzalgorithmus startet beim Anfangspunkt der in Fig. 5 durchgezogene gezeichnete Meßkurve. Von diesem ersten Meßwert wird der zu Beginn beliebig gewählte Sensoroffsetwert abgezogen, und der resultierende, sensoroffsetbereinigte Druckwert, dessen Verlauf in Fig. 5 gepunktet gezeichnet ist, wird mittels der obigen diskretisierten Polytropengleichung um einen Abtastschritt vorwärts gerechnet und dann wieder auf den Offsetwert addiert. Dies führt zum ersten berechneten, d. h. geschätzten Druckwert, dessen Verlauf in Fig. 5 gestrichelt wiedergegeben ist und der nun mit dem im nächsten Schritt neu gemessenen Druckwert verglichen wird. Das daraus gebildete Residuum wird zur Neubestimmung des Sensoroffsets an der betreffenden Stelle herangezogen.

In dieser Weise wird bis zum Endwert des Kompressionsphasenbereichs von z. B.  $-30^\circ$  vor ZOT der geschätzte Verlauf des mittleren gemessenen Brennraumdrucks bestimmt. Wird das Filter im nächsten Arbeitsspiel wieder neu gestartet, kann der letzte Offsetwert aus dem zuletzt berechneten Arbeitsspiel als verbesserter Offset-Startwert dienen, so daß das Filter bereits nach wenigen Grad Kurbelwellenwinkel

einschwingt. Wie die Praxis zeigt und in Fig. 5 veranschaulicht ist, läßt sich mit dieser Vorgehensweise der absolute Brennraumdruckverlauf während der Kompressionsphase vergleichsweise genau durch Schätzung ermitteln, wobei ein nicht-konstanter Sensoroffsetverlauf zugelassen wird.

Der in Fig. 5 gepunktet dargestellte, aus der Polytropengleichung sensoroffsetbereinigt hochgerechnete Druckverlauf stellt dann den gesuchten wahren Brennraumdruckverlauf dar, der durch Addieren des variablen, geschätzten Sensoroffsetverlaufs den gemessenen Druckverlauf, wie aus Fig. 5 ersichtlich, sehr gut in Form der gestrichelten Kurve für den geschätzten mittleren gemessenen Druck approximiert. Es zeigt sich, daß jeweils schon nach einigen wenigen Arbeitsspielen der absolute Brennraumdruckverlauf sehr stabil erhalten wird. Der Offsetverlauf schwingt am Ende jeder Kompressionsphase auf einen festen Wert ein, solange die Brennkraftmaschine stationär läuft. Bei einem Instationärvorgang kann sich das Offsetniveau aufgrund eines veränderten Wärmestroms in die Sensormembran verschieben. Es zeigt sich jedoch, daß der Schätzalgorithmus auch einer solchen Langzeittemperaturdrift gut folgt. Durch das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung kann somit der Brennraumdruckverlauf, insbesondere auch ein Thermoschockbeitrag eines Brennraumdrucksensors, sehr genau mit einer relativ einfachen Brennraumdrucksensorik unter Berücksichtigung eines beliebigen, im allgemeinen nicht konstanten Sensoroffsetverlaufs bestimmt werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung eines Brennraumdruckverlaufs bei einer Brennkraftmaschine, bei dem
  - mittels eines Brennraumdrucksensors (2) Brennraumdruckmeßwerte wenigstens über einen Kompressionsphasen- und/oder Expansionsphasen-Teilbereich eines jeweiligen Brennkraftmaschinen-Arbeitsspiels hinweg aufgenommen werden und
  - der Brennraumdruckverlauf wenigstens über einen Teilbereich eines jeweiligen Brennkraftmaschinen-Arbeitsspiels hinweg mittels einer Auswerteprozedur der aufgenommenen Meßwerte unter Berücksichtigung der Polytropengleichung und eines Sensoroffsets bestimmt wird,
  - wobei in der Auswerteprozedur der Brennraumdruckverlauf durch ein Schätzverfahren sensoroffsetkorrigiert aus der Polytropengleichung bestimmt wird und der Sensoroffset als über den Kompressionsphasen- und/oder Expansionsphasen-Teilbereich hinweg variable Größe behandelt wird, deren Verlauf anhand eines Vergleichs der geschätzten mit den gemessenen Brennraumdruckwerten ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, weiter dadurch gekennzeichnet, daß das Schätzverfahren ein diskretes Schrittverfahren beinhaltet, in welchem unter inkrementalem Fortschreiten einer Arbeitsspiel-Kenngröße ein jeweils neuer Brennraumdruck-Schätzwert aus der Polytropengleichung anhand eines zuvor sensoroffsetkorrigiert ermittelten Schätzwertes berechnet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, weiter dadurch gekennzeichnet, daß das diskrete Schrittverfahren durch eine Kalman-Filterung mit dem gemessenen Brennraumdruck als einer Eingangsgröße und einem geschätzten mittleren Brennraumdruck sowie dem Sensoroffset als Zustandsgrößen ausgeführt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, weiter dadurch gekennzeichnet, daß der Schätzung des Senso-

roffsetverlaufs weißes Rauschen als treibender Term zugrundegelegt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, weiter dadurch gekennzeichnet, daß die aus der modellbildenden Polytropengleichung erhaltenen Schätzwerte und/oder die sensorisch erhaltenen Meßwerte in Abhängigkeit vom Lastzustand der Brennkraftmaschine gewichtet werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, weiter dadurch gekennzeichnet, daß der Exponent der Polytropengleichung in Abhängigkeit von der Brennkraftmaschinentemperatur variabel vorgegeben wird.

7. Vorrichtung zur Bestimmung eines Brennraumdruckverlaufs bei einer Brennkraftmaschine, mit

- einem Brennraumdrucksensor (2) zum Aufnehmen von Brennraumdruckmeßwerten wenigstens über einen Kompressionsphasen- und/oder Expansionsphasen-Teilbereich eines jeweiligen Brennkraftmaschinen-Arbeitsspiels hinweg und
- Auswertemitteln zur Bestimmung des Brennraumdruckverlaufs wenigstens über einen Teilbereich eines jeweiligen Brennkraftmaschinen-Arbeitsspiels hinweg mittels einer Auswerteprozedur der aufgenommenen Meßwerte unter Berücksichtigung der Polytropengleichung und eines Sensoroffsets,

- wobei die Auswertemittel ein Kalman-Filter (1) aufweisen, das den Brennraumdruckverlauf durch eine Kalman-Filterung aus der Polytropengleichung sensoroffsetkorrigiert bestimmt und den Sensoroffset als über den Arbeitsspiel-Teilbereich hinweg variable Größe behandelt, deren Verlauf anhand eines Vergleichs der geschätzten mit den gemessenen Brennraumdruckwerten ermittelt wird, wobei der gemessene Brennraumdruck eine Eingangsgröße und der geschätzte mittlere Brennraumdruck sowie der Sensoroffset mit weißem Rauschen als treibendem Term Zustandsgrößen für das Kalman-Filter bilden.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, weiter dadurch gekennzeichnet, daß das Kalman-Filter (1) einen Eingang für einen Modellierungs-Kovarianzparameter (Q) und/oder einen Eingang für einen Messungs-Kovarianzparameter (R) zur externen Eingabe eines entsprechenden Modellierungs- und/oder Messungsgewichtes aufweist.

---

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

---

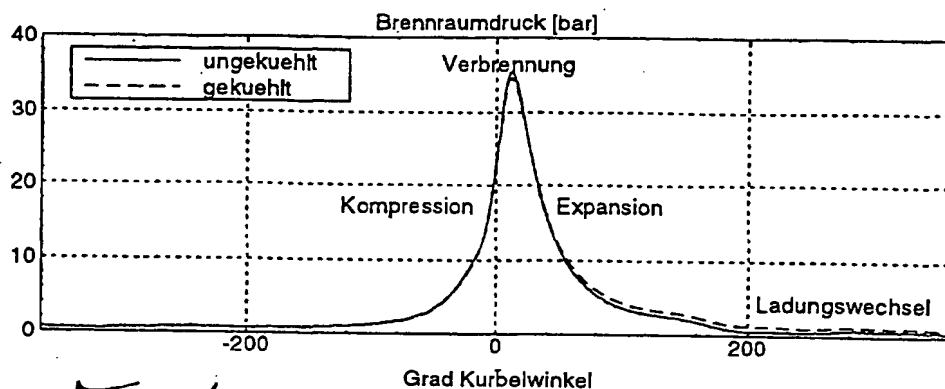


Fig. 1

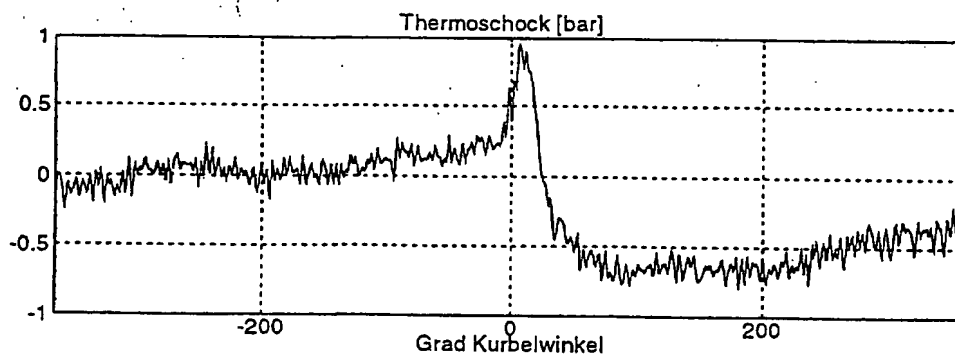


Fig. 2



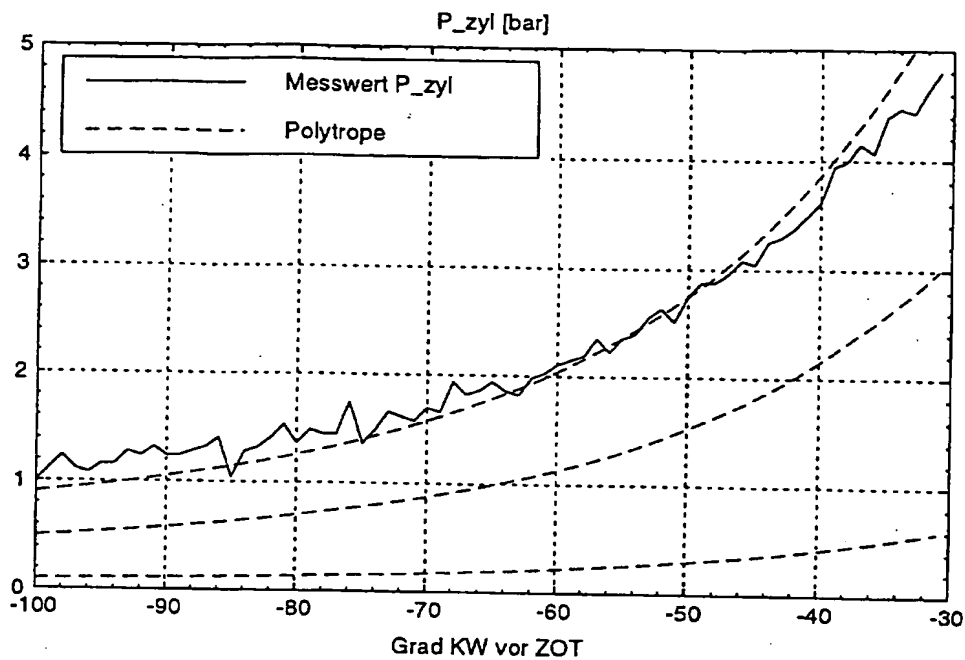


Fig. 3

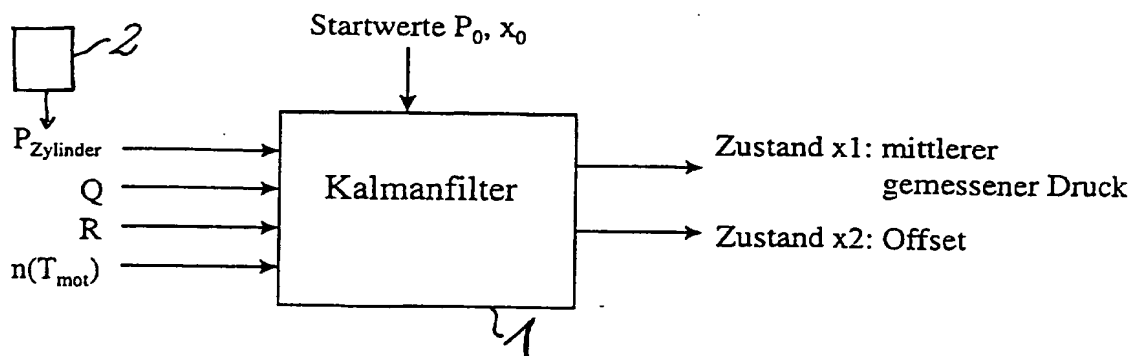


Fig. 4

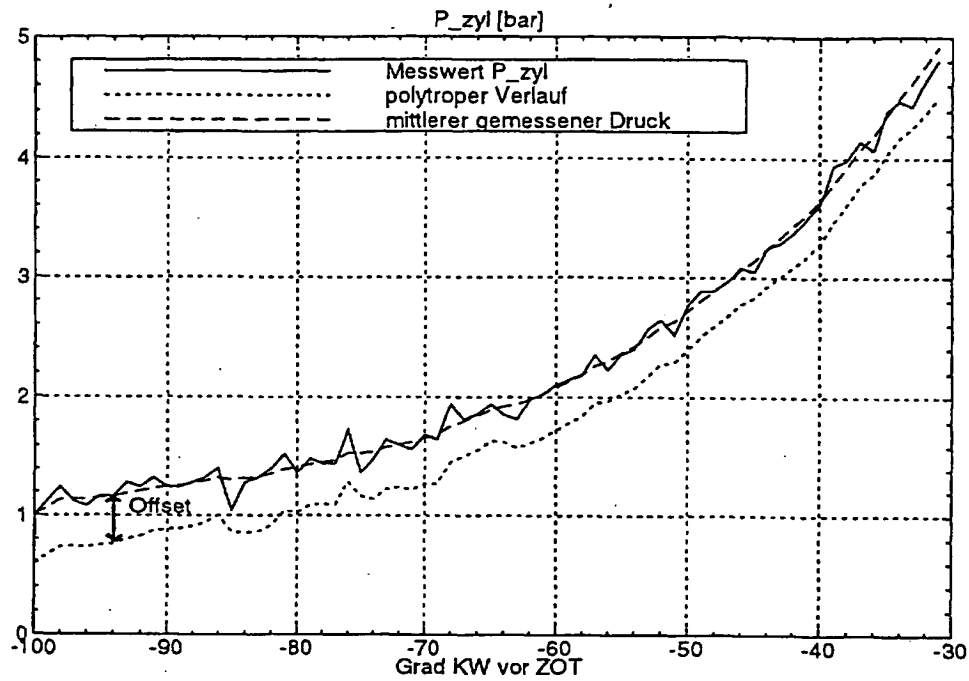


Fig. 5